

京秦提速工程车—路动力仿真与试验的对比研究

梁 波¹, 张艳美¹, 韩自力²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070; 2. 铁道部科学研究院铁建所, 北京 100044)

摘 要: 结合京秦线提速改造工程进行了列车-路基动力仿真计算。在不同速度条件下, 通过路基段加固前后状态下机车车辆运行安全舒适性指标、轨道及路基主要动力性能指标的分析计算, 在此基础上对京秦既有线路基对时速 200km/h 提速的适应性及加固方案的可行性提出了相应评价意见与建议, 并与随后的实车试验进行了对比。试验测试结果验证了仿真分析的可靠性。

关键词: 提速; 车辆; 路基; 动力仿真; 试验

中图分类号: U211.5 **文献标识:** A

DYNAMIC COMPUTER SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE VEHICLE-SUBGRADE SYSTEM FOR THE SPEED ENHANCEMENT AND REMOULDING ENGINEERING OF THE JING-QIN RAILWAY LINE

LIANG Bo¹, ZHANG Yan-mei¹, HAN Zi-li²

(1. School of Civil Engineering of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Railway Construction Institute of China Academy of Railway Sciences, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the speed enhancement and remoulding engineering of Jingqin Railway Line, a dynamic computer simulation of the vehicle-subgrade system is performed. Under various speed and strengthening conditions of subgrade, the safety, comfort index of the vehicle and the main dynamic characters of track and subgrade are analyzed. Comments and advice are given. The suitability of the current subgrade to increasing speed to 200km/h and the feasibility of strengthening design are addressed. The results of the calculation are compared with the test results of vehicle. The reliability of the simulation analysis is verified by the test results.

Key words: increasing speed; vehicle; subgrade; dynamic simulation; test

1 前言

秦沈客运专线是我国第一条设计时速为 200km 的新建快速客运专线。为配合这一客运专线, 如能将京秦线运行速度提至 200km/h, 将来便可构成北京 - 沈阳快速客运通道, 满足现代铁路高速和高效运做方式, 意义十分重大。

在确定京秦线提速改造方案之前, 从理论分析和实车试验两方面对路基及过渡段的动力特性、机车车辆运行安全性和舒适性等进行研究, 考察京秦既有线路基对提速的适应性, 并为确定最终工程改造方案提供科学依据, 显得十分必要。

为此, 铁道部科教司基础处于 2000 年年底组

收稿日期: 2002-08-15; 修改日期: 2003-01-15

基金项目: 甘肃省跨世纪学术带头人基金(333 人才工程资助项目), 甘肃省自然科学基金(ZS031-B25-005-G), 兰州交通大学“青兰工程”资助(QL0310)

作者简介: 梁 波(1964), 男, 四川人, 教授, 博士, 副院长。主要从事岩土及地下工程研究;

张艳美(1973), 女, 山东人, 现在北方交通大学读博士;

韩自力(1965), 男, 山西人, 副研究员, 现任中国铁道科学研究院铁建所副所长

织安排了京秦线时速 200km 提速改造工程第一次实车运行试验任务和列车 - 桥梁、列车 - 路基动力分析任务。本文就是根据要求,进行了列车-路基动力仿真计算。文中计算分析了“神州号”内燃动车组(2 动 3 拖),分别以 160、180、200、220 和 250km/h 速度通过路基段加固前后状态下机车车辆运行安全舒适性指标、轨道及路基主要动力性能指标,在此基础上对京秦既有线路基对时速 200km 提速的适应性及加固方案的可行性提出了相应评价意见与建议,并与随后的实车试验进行了对比。为京秦线 200km/h 提速改造方案提供技术决策依据和参考。

2 主要研究内容

本文主要针对京秦既有线路基状态和本次试验加固地段路基状态,分别计算不同级别提速条件下路基动力响应以及机车车辆运行品质。具体计算的动力指标主要包括:路基表面压力 s_f 、地基表

面压力 s_s 、道床顶面压力 s_b 、轮轨作用力 P 、轮重减载率 DP/P 、乘坐舒适度指标或平稳性指标—车体垂向振动加速度 a_c 等。根据机车车辆运行安全性与舒适性评定标准以及路基和轨道动力性能指标限值对所分析的各种方案与工况提出有关评价意见或建议。

2.1 线路基本状况

京秦既有线轨道结构采用 60kg/m 钢轨, 型混凝土轨枕, 普通碎石道床, 计算路基地段的实际道床厚度为 0.60m。计算地段的既有路基状态及加固方案如表 1 所列。

2.2 列车类型

仿真计算中采用的列车类型与提速试验列车相同,为我国“神州号”内燃动车组,其中机车为大连机车厂生产的 6 轴内燃动车,轴重 22.5t;拖车为四方车辆厂生产的 4 轴双层客车,轴重 16.5t。列车编组方式为 2 动 3 拖,如图 1 所示。机车车辆动力分析参数见附录—^[1]。

表 1 京秦线试验地段路基状态及加固方案

Table 1 The subgrade conditions and strengthening plan of Jing-qin test line

类别	公 里 标	地 质 状 况		路堤高度	路 基 加 固 方 案	
		路 堤	基 底		加 固 方 式	桩深
路基地段	K113+200~K113+400	人工填筑砂粘土	砂粘土, 粉砂	2.5m	布置直径 0.3m 的混凝土挤密桩, 桩位布置: 纵向间距 0.575m, 横向间距 0.6m。	1.0m

注: 仿真计算用轨道及路基结构参数见本文附录一。

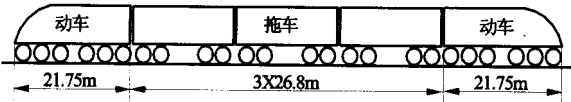


图 1 “神州号”内燃动车组编组示意图

Fig.1 Sketch of Diesel locomotive

2.3 计算方案

5 种车速 160、180、200、220、250km/h 和普通路基段加固与未加固 2 种条件组合共计 10 个仿真计算工况。

3 列车与线路动力性能评定标准

机车车辆在直线轨道上的运行安全性和舒适

表 2 京秦线提速改造工程动力仿真计算采用的安全性与舒适性标准

Table 2 The safety and comfort index standard about the dynamic computer simulation of Jing-qin test line

评价指标	车 体垂向加速度 a_c (舒适性标准)	轮重减载率 DP/P	轮轨垂向力 P_2	道床顶面压力 s_b	基床表面压力 s_f
评定标准	0-1.5m/s ² 优	≤ 0.6	250kN	0.5MPa	0.15MPa (既有线)
	1.5-2.5m/s ² 良				
	2.5-3.5m/s ² 合格				

性一般采用轮重减载率 DP/P 、车体竖向振动加速度 a_c 、轮轨垂向力 P_2 、道床顶面压力 s_b 和路基表面压力 s_f 等指标来评定。本次仿真计算采用的评定标准主要依据 TB/T2360-93《铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定指标》,同时也参照了国内外在提速和高速试验中的评定指标^[2],如表 2 所示,其中车体垂向加速度限值是舒适性标准而非安全性标准;轮轨垂向力 P_2 引用英国铁路(BR)标准;道床顶面压力和路基基床表面压力限值取自《铁路工务技术手册》(轨道分册)。

4 研究方法

4.1 研究思路^[3,4,5]

这里针对以往一些模型存在的问题,将适当强化路基部分的参振作用,并充分考虑材料的真实的物理性能。因此,这里首先分析车辆—轨道—路基系统(简称车路)的动力相互作用,研究路基设计参数与车辆运行品质的相互关系。然后根据计算出的轮轨作用力,再具体计算某一选定路基断面的动力性质。

4.2 车—路动力分析模型^[4]

4.2.1 模型建立及假定

动力分析模型和计算简化模型分别见图2和图3。模型中,车辆的车体和轮对均视为刚体;通过线路的列车由多辆相同或不同形式的机车车辆(以下统称车辆)组成,以速度 V 通过线路;每节车体考虑浮沉、点头两个自由度,每个轮对考虑浮沉一个自由度;为简化计算,将具有二系悬挂或一系轴箱悬挂装置的车辆均简化成一系弹簧悬挂装置。此

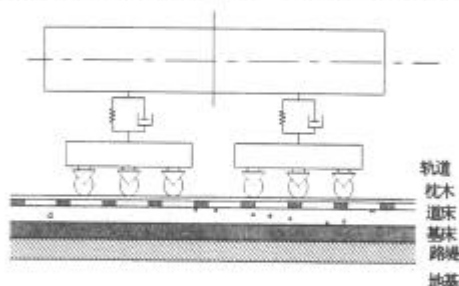


图2 车辆—路基竖向振动简化模型

Fig.2 Vertical vehicle-subgrade vibration model

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_i & 0 \\ 0 & J_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_i \\ \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{zi} & 0 \\ 0 & C_{\theta i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{zi} & 0 \\ 0 & K_{\theta i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \\ &= \sum_{j=1}^{N_v} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{n=1}^N \Phi_n(x_{ij}) (k_j A_n + c_j \dot{A}_n) + k_j z_s(x_{ij}) + c_j \dot{z}_s(x_{ij}) \\ & \sum_{j=1}^N \eta_j l_{ij} \Phi_n(x_{ij}) (k_j A_n + c_j \dot{A}_n) + \eta_j l_{ij} (k_j z_s(x_{ij}) + c_j \dot{z}_s(x_{ij})) \end{aligned} \right\} \\ & M_n \ddot{A}_n + c_n \dot{A}_n + K_n A_n \\ &= \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_w} \Phi_n(x_{ij}) \left\{ \left(\frac{1}{4} M_i + m_{ij} \right) g + k_j z_i + c_j \dot{z}_i + \eta_j l_{ij} (k_j \theta_i + c_j \dot{\theta}_i) - m_{ij} \left[\sum_{n=1}^N \ddot{A}_n \Phi_n(x_{ij}) + \ddot{z}_s(x_{ij}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

其总方程数为 $(2N_v + N)$ 个

式中: M_i 、 J_i —分别为第 i 车体的质量和惯矩;
 Z_i 、 θ_i —分别为第 i 车体质心处的竖向位移和转角;
 K_{zi} 、 C_{zi} —分别为第 i 车体浮沉的总刚度和总阻尼;
 $K_{\theta i}$ 、 $C_{\theta i}$ —分别为第 i 车体摇头总弹簧刚度和总阻尼;
 N_v —轮对数或轮轴数。 k_i 、 c_i —分别为轮对

外,假设在行驶过程中车辆轮对始终与轨面保持密贴。

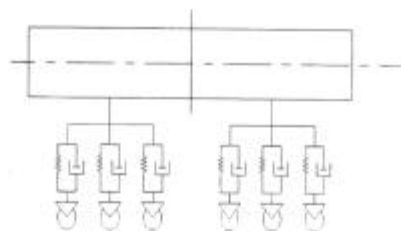


图3 车辆计算简化模型

Fig.3 Vehicle model

对于轨道与路基,按常规方法将结构离散为有限元模型。将钢轨离散成梁单元(或四边形单元),胶垫或垫板、轨枕及以下介质包括路基和地基均离散成四边形单元。由于轨道-路基模型作为有限元模型,直接与车辆振动方程组合计算整个体系的动力响应,则计算工作量非常可观。因此,这里的钢轨-路基模型按子结构法原理建立。由于结构的振动反应主要由最先几个低阶振型起控制作用,所以只需取前几阶振型进行计算,从而使计算工作量大大减少。

4.2.2 动力方程的解耦

以往轮轨动力耦合主要是通过赫兹非线性接触理论即轮轨接触力来实现的。而这里则依据车-路振动的位移相容条件进行解耦或求解。通过车辆的振动方程和轨道-路基的模态方程的组合,整理后可得车-路体系竖向振动方程组

一系弹簧的刚度和阻尼; l_{ij} —轮对距车体中心的距离; η_j —轮对符号函数,车轮 j 在前转向架时 $\eta_j=1$, 在后转向架时 $\eta_j=-1$ 。由于车体下部弹簧为并联,则 $K_{zi} = N_v \cdot k_i$, $C_{zi} = N_v \cdot c_i$ 。根据本文一系装置模式, $K_{\theta i} = 2k_i \cdot [l_{ij}^2 + (l_{ij} + l_w)^2 + (l_{ij} + 2l_w)^2]$,

$C_{qi} = 2c_i[l_{ij}^2 + (l_{ij} + l_w)^2 + (l_{ij} + 2l_w)^2]$ 。
 $F_n(x)$ —为某一位置处第 n 阶振型函数； A_n —为对应的广义坐标(即某一时步下的广义位移)； x_{ij} —为某一横截面处的水平位置。 m_{ij} —为第 i 车体第 j 个轮对质量； $z_s(x_{ij})$ —为某一截面处轨道的不平顺值； N_v 为列车的车辆数，因为每节车体有点头和浮沉两个自由度，故方程组为 $2N_v$ ； N 为轨道-路基模态方程组数。取有代表性的几组低阶振型迭加，比如 N 取 10。

振动方程组采用 Newmark- β 法求解。

4.3 路基的动力分析^[5]

前述车—路垂向耦合动力模型主要从舒适度、减载率、轨面动变形来评价列车运行的品质和安全程度，尤其是分析了路基设计参数对这些指标的影响，这些工作为解决主要包括车体和路基设计参数提供了依据。如何能够同时考虑路基本体某一断面诸如加速度、应力等动力性质，又是路基仿真计算的另一课题。

4.3.1 分析计算模型

首先确定荷载模型。列车荷载是通过钢轨传递到枕木再传递下去的，完全可以用一简单的、能够反映其特点的随机激励形式的力来表达。车路耦合动力分析模型分析中所得到的轮轨作用力正是合适的动荷载模型，但根据枕木分担规律要做适当折减。

其次确定几何离散模型。在匹配关系适当的情况下，沿纵向作用在基床表面上的应力可近似视为均匀的；另一方面，从随机角度而言，每根轨枕受到相同振动荷载的概率是相等的；加之主要由于线路本身的半无限几何性质。于是，线路沿纵向可假定为平面应变问题，加之结构对称，可以取线路某一横断面之半进行二维动力分析。

4.3.2 材料的本构模型及运动方程的求解

这里采用了弹塑性本构模型，在塑性屈服以前遵从弹性应力-应变关系。塑性屈服后应力增量 ds 和应变增量 de 之间的关系为

$$ds = [D_{ep}]de \tag{2}$$

其中 $[D_{ep}]$ 为理想弹塑性本构矩阵^[6]，采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。

根据虚功原理可建立起体系的运动方程，采用纽马克(Newmark)隐式时间直接积分法求解并采用预估-修正法计算。其中阻尼矩阵按瑞利(Rayligh)线性组合法确定。

5 主要计算结果和测试结果

为简明起见，通过仿真计算(自编程序)得出的“神州号”内燃动车组以 160~250km/h 速度通过加固前后普通路基地段时系统各种动力响应指标最大值一并汇总于表 3~4 之中。

表 3 列车通过普通路基段时车辆运行品质计算与测试结果汇总表

Table 3 The comparing between calculation and test result about the vehicle running quality when the vehicle runs through the common subgrade

列车速度 (km/h)	路基 情况	计算与测试 结果对比	动 车 响 应			拖 车 响 应		
			车体加速度(m/s ²)	轮轨作用力(kN)	轮重减载率	车体加速度(m/s ²)	轮轨作用力(kN)	轮重减载率
160	加固前	计算值	2.73	199.5	0.253	0.999	187.9	0.240
	加固后		1.838	193.5	0.215	0.962	181.6	0.198
	上行	测试值	1.91		0.33	1.14		0.51
	下行		1.96		0.47	0.98		0.47
180	加固前	计算值	2.320	206.5	0.197	0.683	194.7	0.289
	加固后		1.872	199.2	0.251	0.614	187.7	0.238
	上行	测试值	2.0		0.48	0.98		0.47
	下行		2.33		0.56	1.20		0.48
200	加固前	计算值	2.670	214.7	0.348	0.834	205.1	0.353
	加固后		2.168	205.8	0.293	0.679	192.3	0.289
	上行	测试值	2.27		0.55	1.24		0.57
	下行		2.70		0.74	1.37		0.58

210	上行	测试值	2.37		0.56	1.14		0.565
	下行		2.76		0.73	1.22		0.58
220	加固前	计算值	2.954	213.1	0.339	0.811	211.3	0.394
		测试值						
	加固后	计算值	2.346	204.6	0.285	0.697	200.3	0.321
		测试值						
250	加固前	计算值	3.482	233.6	0.486	0.928	230.3	0.519
		测试值						
	加固后	计算值	2.842	223.4	0.403	0.697	215.7	0.423
		测试值						

表 4 列车通过普通路基段时路基动力响应计算与测试结果汇总表

Table 4 The comparison between calculation and test result about the subgrade dynamic characteristics when the vehicle runs through the common subgrade

列车速度 (km/h)	路基 情况	计算与测试 结果对比	线 路 响 应			
			道床顶面应力(MPa)	路基表面应力(MPa)	地基表层应力(MPa)	基面加速度(m/s ²)
160	加固前	计算值	0.189	0.059	0.0258	8.331
	加固后		0.185	0.066	0.026	7.033
	上行	测试值		0.058		7.30
	下行			0.057		6.31
180	加固前	计算值	0.179	0.058	0.027	6.203
	加固后		01.70	0.064	0.026	5.518
	上行	测试值		0.064		7.94
	下行			0.062		7.13
200	加固前	计算值	0.184	0.057	0.028	9.402
	加固后		0.174	0.064	0.027	7.809
	上行	测试值		0.67		9.41
	下行			0.068		9.27
220	加固前	计算值	0.183	0.057	0.027	7.719
	加固后		0.173	0.064	0.026	6.602
250	加固前	计算值	0.180	0.057	0.029	8.124
	加固后		0.170	0.063	0.027	6.747

由表 3 可见 :1) 无论是动车还是拖车,加固后的列车运行品质都要好于未加固条件。2) 路基未加固条件下,动车的车体加速度在 $V > 180\text{km/h}$ 速度范围内已超出其舒适性良好标准 2.5m/s^2 ,且随着速度的提高,超限量迅速增大。加固后,各种速度下的车体加速度均明显减小,但 250km/h 时略微低于良好标准。动车的车体加速度明显大于拖车的车体加速度,这说明拖车的舒适度好于动车。计算结果与实车试验结果吻合较好。3) 随车速增大,轮轨力增大,动车的轮轨力略大于拖车,均满足动强度限

值要求。4) 轮重减载率计算结果在 $0.20\sim 0.52$ 之间,表明无论动车还是拖车均能满足轮重减载率安全标准 0.6 。而实车试验结果表明动车在下行时,当车速大于 200km/h 时,安全标准受到挑战。计算结果小于实车试验结果,但趋势一致。

关于线路响应,由表 4 可知 :1) 加固后的道床最大顶面压力小于未加固条件,且满足安全标准。2) 加固后的基床(或称路基)表面压力大于未加固条件。最大值均小于 70kPa ,满足基床对动应力的要求。计算结果与实车试验结果吻合很好。3) 加固

后的基床(或称路基)表面加速度小于未加固条件,与实车试验结果吻合较好。4) 路基动应力衰减较快,对于 2.5m 高的路堤,路堤或地层表面的应力衰减超过 1/2。

6 结论与建议

6.1 结论

1、计算结果表明,当试验列车以 200~220km/h 速度运行于京秦线被试路基段轨道时,无论路基加固与否,能够满足舒适性要求以及路基强度要求。加固后的列车运行品质都要好于未加固条件。

2、本次计算表明,无论什么地段,也不管路基是否加固,路基应力水平都不高,即使在 250km/h 速度条件下也不会超限,因此不起控制作用。

3、当车速大于 200km/h 时,实测表明列车运行安全性尤其是动车的安全标准受到挑战,对提速起控制作用。需考虑有效的路基加固方式。

4、路基所受压力随着深度的增加而迅速衰减,到一定深度时,加固与不加固条件下的动应力值差别很小。

5、从计算结果与实车试验结果比较可以看出,仿真计算是可行可靠的,对实际工程具有参考指导意义。

6.2 建议

根据本文计算结果,普通路基段加固与不加固条件下各项动力性能指标差别很小,均能满足运行安全与舒适性要求,因此建议京秦线 200km/h 提速改造工程可不对路基作全线加固,仅对个别特殊地段(如路基病害段)进行有效的加固处理,从而节省大量工程改造建设投资。

附录 1 京秦线时速 200 公里提速改造工程路基动力仿真计算条件

1、轨道条件

60kg/m 钢轨、混凝土轨枕、普通碎石道碴道床有碴轨道。

钢轨质量: 60.64kg/m; 钢轨弹性模量: $2.059 \times 10^{11} \text{N/m}^2$; 钢轨截面惯量: $3.217 \times 10^{-5} \text{N/m}^4$

轨下垫层刚度 120MN/m 轨枕质量 258.66kg; 轨枕弹模: $2.1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$

轨枕间距: 0.575m; 轨枕平均底宽: 0.275m; 道床密度: 1800kg/m^3 ; 道床模量: 110MPa

道床厚度: 0.6m(路基段)

2、路基

路堤高度: $h=2.5\text{m}$; 基床模量: 100MPa/m(加固前), 180MPa/m(加固后)

路堤模量: 80MPa/m; 地基模量: 40~50MPa/m

3、轨道不平顺

随机不平顺: 郑武线实测不平顺样本

4、计算速度及工况

$V=160、180、200、220、250\text{km/h}$

分别计算加固与未加固两种工况。其加固方式属于水泥土挤密桩类型。路基加固深度: 1.0m。

参考文献:

- [1] 西南交通大学, 兰州铁道学院. 京秦客运通道提速改造工程动力仿真研究报告[R]. 成都:西南交通大学; 兰州: 兰州铁道学院, 2000.
The report of the dynamic computer simulation about increasing speed and remoulding engineering of Jingqin passenger traffic line [R]. Chengdu: South-West Jiaotong University; Lanzhou: Lanzhou Railway University, 2000. (in Chinese)
- [2] 铁道科学研究院. 京秦客运通道提速改造工程第一次实车运行试验研究报告[R]. 北京: 铁道科学研究院, 2000.
The report of first diesel locomotive running test about increasing speed and remoulding engineering of Jingqin passenger traffic line [R]. Beijing: Railway Construction Institute of China Academy of Railway Sciences, 2001.
- [3] 梁波. 高速铁路路基的动力特性及土工合成材料的应用研究[D]. 西南交通大学, 1998.
Liang Bo. The dynamic characteristics of high speed railway subgrade and geosynthetics' application[D]. South West Jiaotong University, 1998. (in Chinese)
- [4] 梁波, 蔡英等. 车-路垂向耦合系统的动力分析[J]. 铁道学报, 2000, 22(5):65-71.
Liang Bo, Cai Ying, et al. Dynamic analysis of the vertical coupled system for vehicle-subgrade model [J]. J. of the China Railway Society, 2000, 22(5):65-71.
- [5] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2):84-88.
Liang Bo, Cai Ying. Dynamic analysis of subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. J. of the China Railway Society, 1999, 21(2):84-88.
- [6] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1999.
Gong Xiaonan. Soil plasticity mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University, Press, 1999. (in Chinese)